

Synthesis, Characterization, and Application of Magnetite (Fe_3O_4) Particles as Gold Adsorbent from Simulation Waste

Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi Partikel Magnetit (Fe_3O_4) sebagai Adsorben Emas dari Limbah Simulasi

Maya Rahmayanti ^{a,1,*}, Sri Juari Santosa ^{b,2}, Sutarno ^{b,3}, Hilmi Hamidi ^{a,3}, Lingga Binagara ^{a,3}

^a Department of Chemistry, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Jl. Marsda Adi Sucipto Yogyakarta, Indonesia

^b Department of Chemistry, Universitas Gadjah Mada, Jl. Sekip Utara, Yogyakarta 55281, Indonesia

¹ maya.rahmayanti@uin-suka.ac.id*; ² sjuari@yahoo.com; ³ sutarno@ugm.ac.id; ⁴ ztchilmi_ztchamidi@yahoo.com; ⁵ binagaralingga@yahoo.com

* corresponding author

ARTICLE INFO

Article history

Received September 11, 2020

Revised November 13, 2020

Accepted January 14, 2021

Keywords

Adsorption

Gold

Magnetite

Synthesis

ABSTRACT

There have been many magnetic adsorbents in solid phase extraction to recover gold metal known as Magnetic Solid Phase Extraction (MSPE). In this study, magnetite was synthesized using the reverse coprecipitation method with the precipitating agent NaOH. The synthesized material was characterized using a Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrophotometer, X-Ray Diffraction (XRD), Vibrating Sample Magnetometer (VSM), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The magnetite was then applied as a gold adsorbent from simulated waste (HAuCl_4). The effect of acidity on the performance of magnetite as gold adsorbent was studied at various pH ranges. Based on the results of characterization using FTIR, magnetite has been successfully synthesized, marked by the appearance of a typical absorption for Fe-O bonds at a wave number of 578 cm^{-1} . It is amplified with an XRD diffractogram, which gives peaks similar to a standard magnetite diffractogram. The value of the magnetite saturation magnetization was 93.90 emu/g . Based on application studies, $[\text{AuCl}_4]$ adsorption on magnetite was excellent in the pH range 3-5. The presumed interactions between $[\text{AuCl}_4]^-$ and magnetite were through electrostatic (dipol-ion) interactions, hydrogen bonding, and redox reactions.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



1. Pendahuluan

Emas merupakan salah satu unsur kimia logam yang langka dan bernilai ekonomi tinggi yang biasa disebut sebagai logam mulia. Logam mulia memiliki sifat fisika dan kimia yang unik seperti memiliki aktivitas katalitik, konduktivitas listrik yang baik dan tahan terhadap korosi [1]. Sifat fisika dan kimia yang unik yang dimiliki emas membuat emas tidak hanya digunakan sebagai perhiasan dan alat investasi jangka panjang. Berbagai aplikasi emas banyak dilaporkan pada berbagai bidang seperti industri elektronik [2], katalisis kimia dan lingkungan [3], serta kedokteran dan industri farmasi [4]. Permintaan terhadap logam emas semakin banyak sedangkan kandungan emas dalam kerak bumi sangat kecil, maka perlu dicari metode pemulihan emas yang efektif baik dari sumber primer maupun sekunder.

Pada tahun 2016, hanya 20% limbah elektronik yang didaur ulang dan menghasilkan sekitar 71,2 ton emas dan 3276 ton perak [5]. Ini menunjukkan bahwa sekitar 80% limbah elektronik dan katalis diolah oleh sistem daur ulang informal atau dibuang ke tempat pembuangan sampah tanpa

pengolahan [6]. Keberadaan logam emas dalam limbah elektronik dan katalis bersama-sama dengan logam dan bahan kimia beracun dan berbahaya [7]. Bahan beracun dan berbahaya ini dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan gangguan kesehatan pada manusia. Untuk itu, perlu dicari metode pemulihan emas yang aman dan efektif.

Logam emas dapat diperoleh kembali dengan metode yang tersedia secara komersial antara lain metode pirometalurgi dan hidrometalurgi. Saat ini, banyak peneliti yang lebih memilih menggunakan metode hidrometalurgi untuk pemulihan emas karena metode hidrometalurgi memiliki kelebihan antara lain mudah dioperasikan, membutuhkan modal yang rendah dan sedikit mengemisikan gas beracun. Jika sumber emas adalah larutan berair maka metode ini dapat langsung diterapkan. Jika sumber emas adalah padatan, diperlukan tahap pelarutan logam emas dengan pelarut yang tepat yang dikenal dengan istilah pelindian.

Di antara berbagai teknik hidrometalurgi untuk memisahkan emas dari larutan pelindian dan limbah, teknik ekstraksi fase padat menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan teknik lainnya seperti ekstraksi cair-cair, ekstraksi pelarut, presipitasi, dan lain-lain. Ekstraksi fase padat dilakukan dengan membiarkan analit yang diinginkan atau target dari larutan untuk menempel atau terikat, baik dengan mekanisme pertukaran ion atau pembentukan kelat pada permukaan bahan padat yang dikenal sebagai adsorben. Analit yang teradsorpsi dilepaskan dari adsorben dengan menggunakan eluen yang sesuai dan larutan yang dimurnikan menjalani pemurnian. Ekstraksi fase padat adalah teknik yang diterapkan secara luas dalam remediasi lingkungan karena beberapa alasan seperti mudah dioperasikan, dan memerlukan biaya yang rendah. Supaya ekstraksi fase padat dapat berlangsung efektif dan efisien, maka diperlukan jenis adsorben yang sesuai.

Adsorben yang paling populer namun konvensional adalah karbon aktif [8], sedangkan adsorben lain yang mulai banyak dikembangkan silika mesopori [9], oksida komposit [10], dan adsorben alami seperti alga [11] dan bakteri [12]. Namun, adsorben ini memiliki kelemahan yaitu masih menggunakan sentrifugasi konvensional atau metode filtrasi untuk pemisahan yang menimbulkan masalah operasional dan kepraktisan. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa tahun terakhir telah banyak dikembangkan adsorben yang bersifat magnetik dalam ekstraksi fase padat untuk memulihkan logam emas yang dikenal dengan istilah Ekstraksi Fase Padat Magnetik (MSPE) seperti asam humat termodifikasi magnetit [13], asam salisilat dan asam galat termodifikasi magnetit [14] dan asam galat termodifikasi magnetit [15].

Dalam proses adsorpsi, adsorben magnetik dipisahkan dari larutan melalui medan magnet luar. MSPE lebih menguntungkan daripada teknik ekstraksi fase padat konvensional karena lebih sederhana dan ramah lingkungan (tidak memerlukan proses sentrifugasi dan filtrasi dan bahkan tanpa pelarut). Inilah yang menyebabkan banyak penelitian yang mengeksplorasi adsorben potensial untuk MSPE.

Pada penelitian ini, adsorben magnetik yang disintesis dan diaplikasikan sebagai adsorben emas dari limbah simulasi adalah magnetit (Fe_3O_4). Magnetit dipilih karena merupakan salah satu jenis besi oksida yang memiliki sifat magnet yang tinggi dan memiliki struktur permukaan yang dapat bermuatan positif dan negatif pada rentang pH tertentu. Karakterisasi magnetit dilakukan untuk mempelajari sifat fisika dan kimia magnetit. Aplikasi magnetit sebagai adsorben emas dari limbah simulasi dipelajari pada berbagai rentang pH.

2. Metodologi Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah alat-alat gelas standar laboratorium, pH meter merk Orion 920A, *shaker* (Osk), *magnetic stirrer*, neraca analitik BP 110 Sartorius, desikator, pompa vakum, oven/furnace 4800 Thermolyne. Karakterisasi material menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR), Shimadzu-8201 PC, *X-Ray Diffraction* (XRD) model Shimadzu XRD-6000, Spektrofotometer UV-VIS 1601 PC Shimadzu, *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS) Analytic Jena ContraAA 300, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) tipe JEOL tipe JED-2300, *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) tipe OXFORD VSM 1.2H, dan fotomikroskop optik tipe Ephitot + Nikon D60.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah bahan-bahan berkualitas analitik (*analytical grade*) buatan E. Merck yaitu: besi (II) sulfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), besi (III) klorida heksahidrat ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), natrium hidroksida (NaOH), asam klorida (HCl). Larutan HAuCl_4 dipreparasi oleh Laboratorium Kimia Analitik UGM dan akuabides.

2.2. Prosedur Kerja

1) Sintesis Magnetit (Fe_3O_4) dengan Metode Kopresipitasi Terbalik

Larutan NaOH 0,5 M dimasukkan ke dalam labu leher tiga. Leher kiri diletakkan termometer sedang leher kanan ditutup rapat. Leher tengah digunakan untuk meneteskan campuran larutan Fe^{3+} ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dan Fe^{2+} ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dengan perbandingan 2:1 sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada temperatur 60 °C. Endapan yang terbentuk disaring dengan penyaring buchner dan dikeringkan dalam oven selama 3 jam pada temperatur 60 °C.

2) Karakterisasi Magnetit (Fe_3O_4)

Endapan yang sudah kering dan berbentuk serbuk dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRD, SEM, dan VSM untuk menentukan sifat fisika dan kimia magnetit.

3) Preparasi Limbah Emas Simulasi

Limbah emas simulasi yang digunakan pada penelitian ini adalah larutan HAuCl_4 yang dipreparasi di Laboratorium Kimia Analitik UGM. Larutan HAuCl_4 1000 ppm dibuat dengan melarutkan 1 gram emas batang dengan kemurnian 99,9% pada larutan *aqua regia*, kemudian diencerkan menjadi 25 ppm.

4) Uji stabilitas magnetit pada berbagai pH

Magnetit diuji kestabilannya pada rentang pH 1-10 untuk menentukan rentang pH yang akan digunakan pada tahap interaksi dengan larutan HAuCl_4 dengan cara kerja sebagai berikut: sebanyak 10 mg Fe_3O_4 ditambahkan pada akuabides yang telah diatur pH-nya dengan variasi pH 1-10. Selanjutnya campuran dikocok selama 1 jam dan disaring menggunakan penyaring Buchner. Filtrat diambil untuk diukur absorbansinya menggunakan AAS.

5) Aplikasi Magnetit (Fe_3O_4) sebagai Adsorben Emas dari Limbah Simulasi

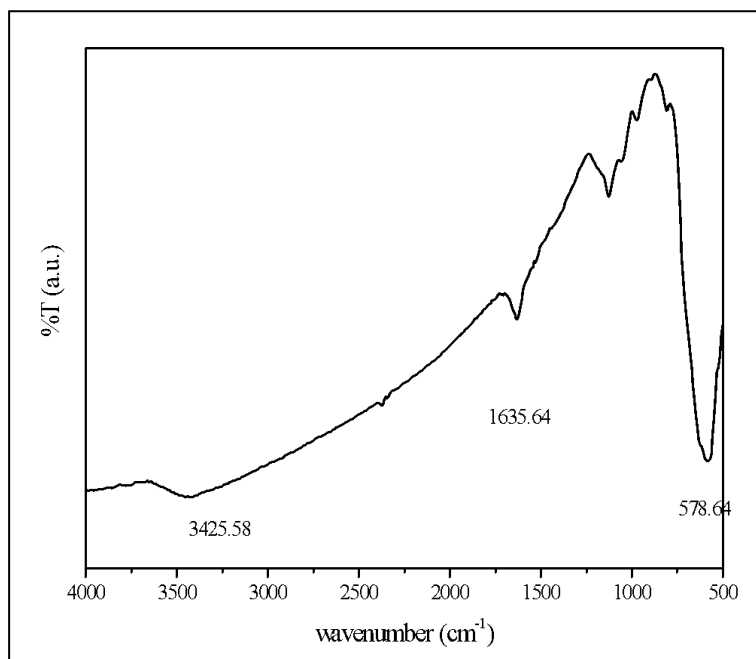
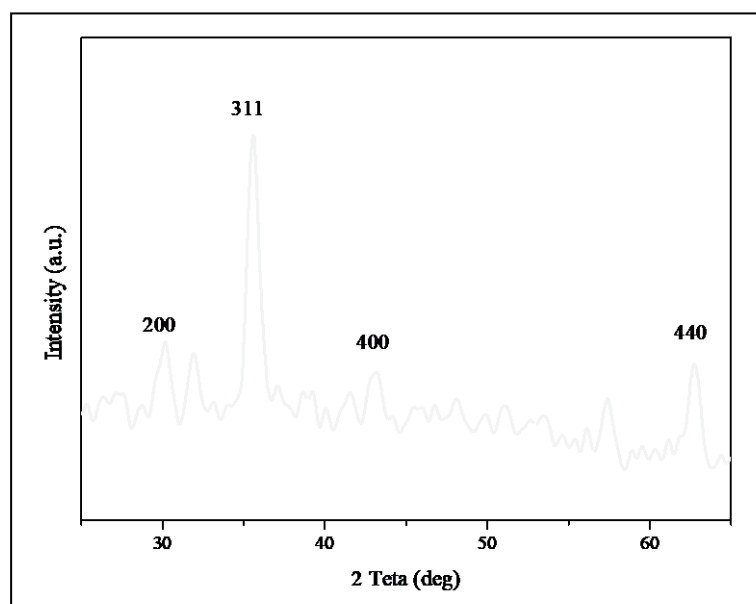
Larutan HAuCl_4 25 ppm dimasukkan ke dalam erlenmeyer dan diatur pHnya pada rentang pH 2-7. Selanjutnya dimasukkan 10 mg Fe_3O_4 pada masing-masing erlenmeyer dan dikocok selama 18 jam pada suhu kamar. Campuran kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring *Whatman* 42, konsentrasi $[\text{AuCl}_4]^-$ dalam filtrat diukur menggunakan AAS. Padatan yang diperoleh dikarakterisasi menggunakan fotomikroskop optik.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Magnetit Hasil Sintesis

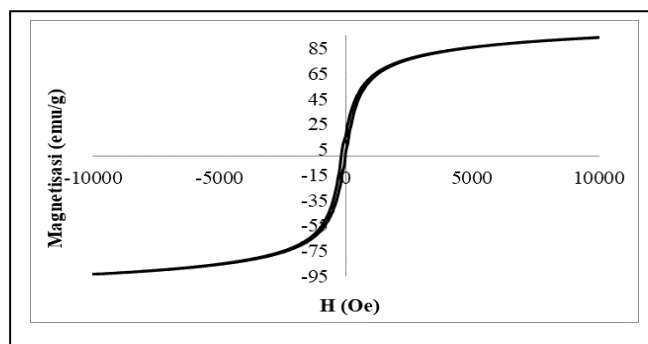
Pada penelitian ini, sintesis magnetit dilakukan melalui metode kopresipitasi dengan agen pengendap NaOH . Berdasarkan spektra FTIR yang disajikan pada Gambar 1, senyawa hasil sintesis memberikan serapan tajam pada daerah 578 cm^{-1} yang merupakan serapan khas untuk ikatan Fe-O magnetit. Munculnya serapan lain pada daerah 3425 dan 1636 cm^{-1} diduga berasal dari ikatan O-H dari $\text{Fe}(\text{OH})_2$, jenis besi oksida lain yang dapat terbentuk dalam proses sintesis magnetit, kemungkinan lain adalah dari gugus $-\text{OH}$ H_2O .

Untuk membuktikan bahwa senyawa yang terbentuk adalah senyawa magnetit murni maka dilakukan karakterisasi menggunakan XRD. Difraktogram XRD disajikan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, terlihat keberadaan puncak-puncak utama, yaitu pada sudut difraksi sekitar 30 , 35 , 43 , 57 , dan 62° dengan indeks Miller berturut-turut adalah 220 , 311 , 400 , 511 , dan 440 . Sudut difraksi puncak-puncak ini sesuai dengan sudut difraksi puncak-puncak yang muncul pada difraktogram magnetit standar (JSPDS No. 89.0691).

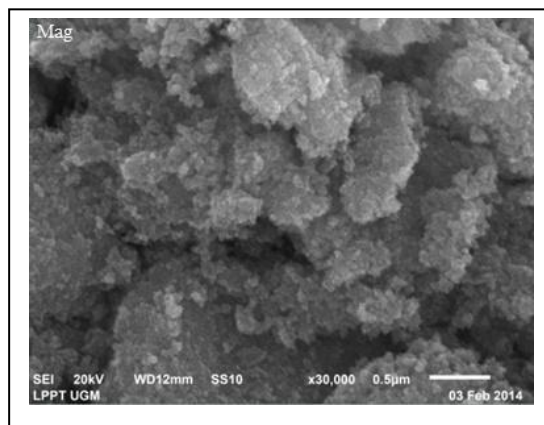
**Gambar 1.** Spektra FTIR magnetit**Gambar 2.** Difraktogram XRD magnetit

Penentuan sifat magnet dari magnetit hasil sintesis diukur menggunakan VSM. Kurva magnetisasi hasil penelitian ini disajikan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa nilai magnetisasi saturasi magnetit adalah 93,90 emu/g. Nilai magnetisasi saturasi magnetit hasil penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah ada sebelumnya [16,17] yang menghasilkan nilai M_s berturut-turut 63,13 emu/g dan 67,50 emu/g. Magnetisasi saturasi (M_s) adalah jumlah magnetisasi maksimum yang dicapai ketika semua momen magnet sejajar. Artinya semakin kecil ukuran partikel jumlah magnetisasi maksimum yang dicapai akan lebih tinggi. Dengan demikian ukuran partikel magnetit hasil penelitian ini lebih kecil daripada ukuran partikel magnetit hasil penelitian sebelumnya.

Karakterisasi material hasil sintesis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) bertujuan untuk melihat morfologi senyawa hasil sintesis. Foto SEM hasil penelitian ini disajikan pada Gambar 4. Foto SEM menunjukkan lempengan dengan morfologi yang tidak begitu jelas.



Gambar 3. Kurva magnetisasi magnetit



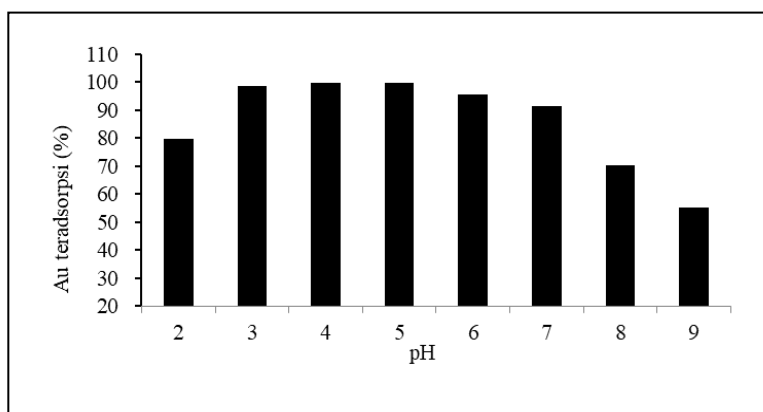
Gambar 4. Foto SEM magnetit

3.2. Stabilitas Magnetit

Uji stabilitas magnetit dilakukan untuk menentukan rentang pH yang digunakan saat aplikasi. Berdasarkan uji stabilitas magnetit pada berbagai rentang pH seperti yang disajikan pada Gambar 6, terlihat bahwa magnetit lebih stabil pada rentang pH 3-10. Magnetit larut pada pH 1, sedangkan pada pH 2, magnetit terlarut sekitar 55%. Stabilitas magnetit mempengaruhi performa adsorben magnetit sebagai adsorben $[\text{AuCl}_4]^-$.

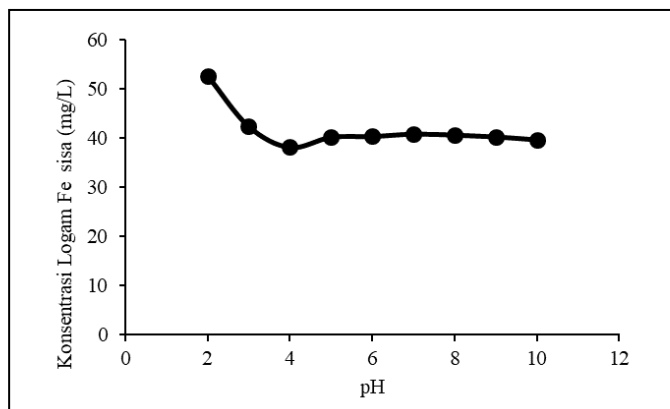
3.3. Pengaruh Keasaman HAuCl_4 terhadap Performa Adsorben Magnetit

Pengaruh keasaman $[\text{AuCl}_4]^-$ terhadap performa adsorben magnetit dipelajari dengan membuat larutan $[\text{AuCl}_4]^-$ 25 ppm dengan variasi pH 2-9 untuk diinteraksikan dengan partikel magnetit. Gambar 5 menunjukkan bahwa keasaman mempengaruhi adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit. Berdasarkan Gambar 5, adsorpsi terjadi dengan baik pada rentang pH 3-5, dan optimum pada pH 4, sedangkan di atas pH 4 adsorpsi mengalami penurunan. Kemampuan adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit dalam berbagai pH larutan dapat dipengaruhi oleh kestabilan magnetit, muatan permukaan magnetit dan distribusi ion kompleks Au(III) dalam berbagai pH larutan berair.



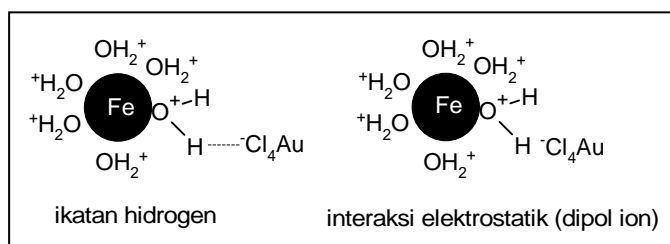
Gambar 5. Pengaruh pH $[\text{AuCl}_4]^-$ terhadap performa adsorben magnetit

Kestabilan magnetit pada berbagai rentang pH mempengaruhi kemampuan adsorpsi magnetit terhadap $[\text{AuCl}_4]^-$. Stabilitas magnetit pada berbagai pH disajikan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, magnetit kurang stabil pada pH 2 sehingga kemampuan adsorpsi juga lebih kecil pada pH ini, sedangkan pada pH 3, 4, dan 5 adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit tampak baik dan optimum pada pH 4. Sementara itu, magnetit cukup stabil pada $\text{pH} > 5$, namun pada penelitian ini kemampuan adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit semakin menurun pada $\text{pH} > 5$. Hal ini dapat dijelaskan melalui % distribusi ion kompleks Au(III) dalam berbagai pH larutan berair dan muatan permukaan magnetit. Pada $\text{pH} > 5$, spesies $[\text{AuCl}_4]^-$ semakin berkurang dan digantikan dengan keberadaan spesies $[\text{AuCl}_3(\text{OH})]^-$, $[\text{AuCl}_2(\text{OH})_2]^-$, $[\text{AuCl}(\text{OH})_3]^-$ dan $[\text{Au}(\text{OH})_4]^-$ [18,19]. Berkurangnya spesies $[\text{AuCl}_4]^-$ di dalam larutan dan bertambahnya spesies lain menyebabkan terjadinya persaingan antar spesies dalam berinteraksi dengan magnetit. Hal inilah yang menyebabkan adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit menurun pada $\text{pH} > 5$.



Gambar 6. Stabilitas magnetit pada berbagai rentang pH

Adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit dipengaruhi juga oleh muatan permukaan magnetit. Ketika pH sistem lebih rendah dari pH_{PZC} magnetit ($\text{pH} < 6-6,8$), maka muatan permukaan magnetit cenderung positif, sehingga dimungkinkan terjadi interaksi antara magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ melalui interaksi elektrostatik (dipol-ion) [20]. Kemungkinan lain adalah melalui ikatan hidrogen antara atom hidrogen dari $\text{Fe}(\text{II,III})\text{OH}_2^+$ dengan atom Cl dari $[\text{AuCl}_4]^-$. Hal ini dibuktikan dengan tingginya % $[\text{AuCl}_4]^-$ yang teradsorpsi pada pH 3, 4, dan 5. Sementara itu, pada pH yang lebih tinggi dari pH_{PZC} magnetit ($\text{pH} > 6-6,8$), % $[\text{AuCl}_4]^-$ yang teradsorpsi semakin menurun. Hal ini disebabkan karena muatan permukaan magnetit cenderung negatif ($\text{Fe}-\text{O}^-$) di atas pH_{PZC} magnetit, sehingga interaksi antara magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ sukar terjadi. Interaksi yang terjadi antara magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ diilustrasikan pada Gambar 7.

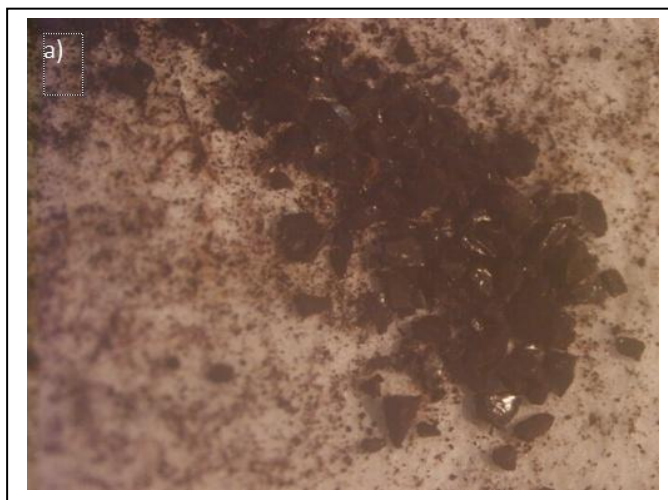


Gambar 7. Ilustrasi interaksi antara magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$

Jika diperhatikan Gambar 5 kembali, % $[\text{AuCl}_4]^-$ yang teradsorpsi pada $\text{pH} > 7$ masih di atas 50%, jika interaksi yang terjadi antara permukaan magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ adalah melalui interaksi elektrostatik atau melalui ikatan hidrogen atau melalui interaksi dipol-ion, tentunya jumlah $[\text{AuCl}_4]^-$ yang teradsorpsi tidak sebesar ini. Diduga, reaksi yang terjadi antara permukaan magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ adalah melalui reaksi redoks, dimana $[\text{AuCl}_4]^-$ teradsorpsi pada magnetit yang diikuti dengan terjadinya reduksi Au(III) menjadi Au(0) dan oksidasi magnetit menjadi maghemite sebagaimana yang disajikan pada Gambar 8. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilaporkan sebelumnya [21]. Hasil dugaan ini diperkuat dengan hasil foto mikroskop optik magnetit yang disajikan pada Gambar 9 yang menunjukkan keberadaan endapan kuning mengkilat diantara endapan hitam yang diduga adalah logam Au.

| | |
|-----------------|---|
| reaksi reduksi | $\text{AuCl}_4^- + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Au}(0) + 4\text{Cl}^-$ |
| reaksi oksidasi | $6[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}]\text{O}_4 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 9[\text{Fe}_2^{3+}]\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 3\text{e}^-$ |
| reaksi redoks | $6[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}]\text{O}_4 + \text{AuCl}_4^- + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 9[\text{Fe}_2^{3+}]\text{O}_3 + \text{Au}(0) + 4\text{Cl}^- + 6\text{H}^+$ |

Gambar 8. Mekanisme interaksi antara magnetit dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ melalui reaksi redoks



Gambar 9. Hasil foto mikroskop optik magnetit

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini, magnetit disintesis menggunakan metode kopresipitasi terbalik dengan agen pengendap NaOH. Hasil karakterisasi FTIR, XRD, VSM, dan SEM menunjukkan magnetit telah berhasil disintesis. Spektra FTIR menunjukkan keberadaan puncak serapan di daerah 578 cm^{-1} yang merupakan serapan khas untuk ikatan Fe-O magnetit. Difraktogram XRD juga memberikan puncak-puncak yang mirip dengan difraktogram magnetit standar. Sifat magnet dari magnetit berdasarkan nilai magnetisasi saturasi magnetit cukup kuat. Nilai M_s magnetit hasil penelitian ini lebih tinggi dibandingkan magnetit yang disintesis pada penelitian sebelumnya. Namun, hasil foto SEM tidak dapat menggambarkan struktur morfologi magnetit dengan baik. Magnetit hasil penelitian ini stabil pada rentang $\text{pH} > 2$. Kestabilan magnetit pada berbagai rentang pH mempengaruhi performa magnetit sebagai adsorben $[\text{AuCl}_4]^-$. Berdasarkan penelitian ini, adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada magnetit sangat baik pada rentang pH 3-5. Dugaan interaksi yang terjadi antara $[\text{AuCl}_4]^-$ dan magnetit adalah melalui interaksi elektrostatik, ikatan hidrogen dan reaksi redoks.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih atas layanan dan fasilitas yang diberikan oleh beberapa laboratorium tempat penulis melaksanakan penelitian. Laboratorium tersebut antara lain Laboratorium Kimia UIN Sunan Kalijaga, Laboratorium Kimia Analitik UGM dan LPPT UGM.

Referensi

- [1] M.L. Zientek, dan P.J. Loferski, Platinum-group elements: so many excellent properties. US Geological Survey, 2014.
- [2] L.A. Diaz dan T.E. Lister, "Economic evaluation of an electrochemical process for the recovery of metals from electronic waste," Waste Manage, vol. 74, hlm. 384–392, 2018.
- [3] H. Dong, J. Zhao, J. Chen, Y. Wu dan B. Li, "Recovery of platinum group metals from spent catalysts: a review," Int. J. Miner. Process, vol. 145, hlm. 108–113, 2015.
- [4] S. Hu, X. Dou, L. Zhang, Y. Xie, S. Yang, dan M. Yang, "Rapid detection of aflatoxin B1 in medicinal materials of radix and rhizome by gold immunochromatographic assay," Toxicon, vol. 150, hlm. 144–150, 2018.

- [5] C.P. Balde, V. Forti, V. Gray dan R. Kuehr, *The Global e-waste Monitor*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.
- [6] J. Cao, Y. Chen, B. Shi, B. Lu, X.M. Zhang, X.H. Ye, G.S. Zhai, C.B. Zhu dan G.G. Zhou, "WEEE recycling in Zhejiang Province, China: generation, treatment, and public awareness," *J. Clean. Prod.* Vol. 127, hlm. 311–324, 2016.
- [7] Y.F. Gu, Y.F. Wu, M. Xu, X.Z. Mu dan Zuo, T.Y., "Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in china," *J. Clean. Prod.*, vol. 127, hlm. 331–338, 2016.
- [8] H. Yu, F. Zi, X. Hu, Y. Nie, Y. Chen, H. Cheng. "Adsorption of gold from thiosulfate solutions with chemically modified activated carbon," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 1-2, hlm. 408-428, 2017.
- [9] H. Ebrahimzadeh, N. Shekari, N. Tavassoli, M.M. Amini, M. Adineh, dan O. Sadeghi, "Extraction of trace amounts of silver on various amino-functionalized nanoporous silicas in real samples," *Microchim. Acta*, vol. 170, hlm. 171–178, 2010.
- [10] A. Sari dan M. Tüzen, "Adsorption of silver from aqueous solution onto raw vermiculite and manganese oxide-modified vermiculite," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 170, hlm. 155–163, 2013.
- [11] S. Wang, T. Vincent, J.C. Roux, C. Faur, E. Guibal, "Pd(II) and Pt(IV) sorption using alginate and algal-based beads," *Chem. Eng. J.*, vol. 313, hlm. 567–579, 2017.
- [12] L. Li, H. Qing, Z. Jinghai, Q. Hongyan dan Z. Guoqiang, "Resistance and biosorption mechanism of silver ions by *Bacillus cereus* biomass," *J. Environ. Sci.*, vol. 23, hlm. 108–111, 2011.
- [13] M. Rahmayanti, G. Abdillah, S. J. Santosa, dan Sutarno, "Application of Humic Acid Isolated from Kalimantan Peat Soil Modifying Magnetite for Recovery of Gold," *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, vol. 8 no. 2, hlm. 77-83, 2019.
- [14] M. Rahmayanti, S. J. Santosa, dan Sutarno, "Comparative Study on the Adsorption of $[\text{AuCl}]^-$ onto Salicylic Acid and Gallic Acid Modified Magnetite Particles," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 16. no. 3, hlm. 329-337, 2016.
- [15] M. Rahmayanti, S. J. Santosa, dan Sutarno, "Mechanisms of Gold Recovery from Aqueous Solutions using Gallic acid-modified Magnetite Particles Synthesized via Reverse Co-precipitation Method," *International Journal of ChemTech Research*. vol. 9, no. 4, hlm. 446-452, 2016.
- [16] S. Aliramaji, A. Zamanian, dan Z. Sohrabijam, "Characterization and Synthesis of Magnetite Nanoparticles by Innovative Sonochemical Method," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 11, hlm. 265-269, 2015.
- [17] D.D. Suppiah dan S. Hamid, "One Step Facile Synthesis of Ferromagnetic Magnetite Nanoparticles," *J. Ferromagn. Magn.*, vol. 414, hlm. 204-208, 2016.
- [18] M. Wojnick, E. Rudnik, M. Luty-Błocho, K. Paclawski, dan K. Fitzner, "Kinetic Studies of Gold(III) Chloride Complex Reduction and Solid Phase Precipitation in Acidic Aqueous System Using Dimethylamine Borane as Reducing Agent," *Hydrometallurgy*, vol. 127–128, hlm. 43–53, 2012.
- [19] J. Paclawski, dan K. Fitzner, "Kinetics of gold(III) chloride complex reduction using sulfur(IV)," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 35B, hlm. 1071–1085, 2004.
- [20] R. Ranjbar, M. Naderi, H. Omidvar, Gh. Amoabediny, "Gold recovery from copper anode slime by means of magnetite nanoparticles (MNPs)," *Hydrometallurgy*, vol. 143, hlm. 54–59, 2014.
- [21] R.D. Alorro, N. Hiroyoshi, H. Kijitani, M. Ito, dan M. Tsunekawa, "On The Use of Magnetite for Gold Recovery from Chloride Solution," *Miner. Process. Extr. M.* vol. 31, hlm. 201-213, 2010.